



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ»**

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

**по результатам подготовленной  
научно-квалификационной работы (диссертации)**

**на тему:**

**«Разработка экспериментальных методик и алгоритмов обработки  
электрофизиологических измерений активности мозга в когнитивных  
парадигмах реального времени»**

**ФИО Волкова Ксения Владимировна**

**Направление подготовки «37.06.01 Психологические науки»**

**Профиль (направленность) программы «Психофизиология»**

**Аспирантская школа по психологии**

Аспирант \_\_\_\_\_ / Волкова К.В. /  
*подпись*

Научный руководитель \_\_\_\_\_ / Осадчий А.Е. /  
*подпись*

Директор Аспирантской школы \_\_\_\_\_ / Хачатурова М.Р. /  
*подпись*

**Москва, 2019**

## Оглавление

Введение.....	3
Актуальность исследования.....	3
Проблема исследования .....	4
Состояние разработанности проблемы исследования .....	6
Объект и предмет исследования.....	8
Цель и задачи исследования .....	8
Гипотезы исследования.....	9
Теоретико-методологические основы исследования .....	10
Методы исследования.....	10
Выборка и эмпирическая база исследования .....	10
Этапы организации исследования.....	11
Теоретическая и практическая значимость исследования .....	12
Основные результаты исследования и положения, выносимые на защиту....	13
Апробация результатов исследования (конференции, научные публикации)	14
Список использованной литературы.....	16

# Введение

## Актуальность исследования

Системы, производящие обработку электрофизиологических измерений активности мозга в режиме реального времени, в частности, интерфейсы мозг-компьютер (ИМК), находят применение в ряде областей и используются для решения различных исследовательских и практических задач (Abdulkader et al., 2015). Поскольку ИМК реализует дополнительный канал обмена информацией со внешней средой, независимый от обычных путей, таких как периферические нервы и мышцы, в первую очередь его использование актуально для восстановления возможностей движения и коммуникации у людей, потерявших возможность движения в результате травмы или болезни (Chaudary et al., 2016). Реализовано большое количество вариантов ИМК, основанных на использовании неинвазивных (не требующих хирургического вмешательства) технологий измерения активности мозга, таких как, например, электроэнцефалограмма (ЭЭГ) (Machado et al., 2010), однако пропускная способность их управляющего канала ограничена физическими возможностями этого метода измерения сигнала (Waldert et al., 2016). В то же время, для эффективного использования ИМК, особенно в клинической практике, необходима стабильность, точность декодирования команд и, в идеале, возможность декодирования не дискретных команд, а непрерывных траекторий (Mak et al., 2009; Schalk, 2010). Улучшение рабочих характеристик неинвазивных систем возможно за счет использования современных методов машинного обучения, а также разработки алгоритмов, использующих дополнительную информацию о физиологических процессах, на которых основано управление интерфейсом, или особенностях экспериментальных парадигм (Jayaram et al., 2016; Padfield et al., 2019). Более радикальным и существенно более эффективным методом повышения пропускной способности канала в ИМК

является использование инвазивных методов регистрации активности головного мозга, которые позволяют выделять более полную информацию о параметрах движения и реализовывать управление сложными протезами с большим количеством степеней свободы (Yanagisawa et al., 2012; Collinger et al., 2013). Таким образом, в настоящее время актуальной является разработка методов повышения рабочих характеристик неинвазивных ИМК, а также экспериментальных парадигм и алгоритмов обработки сигнала для реализации интерфейсов на основе инвазивных технологий.

### **Проблема исследования**

При проектировании нейроинтерфейсов, в том числе идеомоторных ИМК (ИМК, детектирующих состояния, связанные с воспроизведением реальных или воображаемых движений), часто используются неинвазивные методы измерения активности мозга, в частности, электроэнцефалограмма (ЭЭГ) (Machado et al., 2010b; Padfield et al., 2019). ЭЭГ как метод измерения электрической активности мозга имеет ряд преимуществ (такие как, например, доступность, эргономичность, безопасность), которые обосновывают распространенность его использования. Тем не менее, пропускная способность ИМК на основе ЭЭГ ограничена из-за таких особенностей сигнала, как нестационарность, высокий уровень шума, наличие миографических и окулографических артефактов, а также низкое пространственное разрешение, которое ограничивает количество возможных распознаваемых состояний (Mak et al., 2009; Waldert et al., 2016). Для улучшения характеристик интерфейса, таких как стабильность и точность декодирования состояний, могут быть использованы различные методы, в том числе направленные на использование некоторой априорной (заранее известной) информации о физиологии, электрических феноменах, используемых для управления интерфейсом, или особенностях экспериментальной парадигмы (Jayaram et al., 2016; Padfield et al., 2019). Тем

не менее, поскольку ограничения неинвазивных интерфейсов в первую очередь связаны с физическими особенностями метода, который используется для измерения электрической активности мозга, значительно повысить информативность измеряемого сигнала и, как следствие, пропускную способность информационного канала, возможно только за счет использования инвазивных методов (Waldert et al., 2016). Как показывают исследования, использование инвазивных интерфейсов, основанных на имплантации в кору микроэлектродных массивов (Kim et al., 2018), позволяет декодировать параметры движения и реализовывать управление устройством с большим количеством степеней свободы (Hochberg et al. 2012; Collinger et al., 2013; Miranda et al., 2015). Однако применение таких интерфейсов несет за собой риски, связанные с имплантацией (Kohler et al., 2017), и ограничено отдельными пациентами, для которых были разработаны специализированные системы в рамках клиники (Miranda et al., 2015), а также исследованиями на животных (Carmena et al., 2003; Velliste et al., 2008). Развивающейся областью на данный момент является использование технологии электрокортикограммы (ЭКоГ), в которой электроды размещаются на поверхности мозга субдурально или эпидурально (под либо поверх твердой мозговой оболочки), без нарушения целостности коры (Schalk & Leuthardt, 2011).

Электрокортикография является более безопасным методом по сравнению с имплантацией микроэлектродных массивов и рутинно используется в клинической практике для локализации эпилептического очага, определении границ опухолей и картировании невосполнимой коры (Hill et al., 2012). Характеристики сигнала ЭКоГ (высокое пространственное разрешение, низкий уровень шума, отсутствие окулографических и миографических артефактов, близость источников) позволяют точно детектировать начало движения, различать движение отдельных пальцев, декодировать такие параметры, как скорость и направление движения, и использовать интерфейс для управления сложным протезом руки (Ball et al. 2009; Kubanek et al. 2009;

Yanagisawa et al. 2011; Chestek et al. 2013; Hotson et al. 2016). Кроме того, электроды, используемые для регистрации сигнала, могут также быть использованы для кортикальной стимуляции, которая в отдельных случаях является частью процедуры картирования (Ritaccio et al., 2018, Kramer et al., 2019). Таким образом, ЭКоГ предоставляет возможности для исследования и разработки методов, которые с развитием технологий имплантации могут лечь в основу создания сложных, в том числе двунаправленных, интерфейсов мозг-компьютер. Для реализации таких систем необходима разработка экспериментальных парадигм и методов обработки сигнала, которые позволят декодировать параметры движения в режиме реального времени и осуществлять кортикальную стимуляцию.

### **Состояние разработанности проблемы исследования**

Опыт разработки неинвазивных ИМК показал, что использование современных методов обработки сигнала и анализа данных, а также дополнительной информации из области нейрофизиологии и эргономики позволяет реализовывать нейроинтерфейсы, которые могут быть использованы для восстановления возможностей движения и коммуникации, а также решения других клинических и исследовательских задач (Abdulkader et al., 2015). Однако из-за фундаментальной ограниченности пропускной способности, достижимой при использовании неинвазивных методов нейровизуализации (Waldert et al., 2016), дальнейшее расширение возможностей нейроинтерфейсов, в частности, идеомоторных ИМК, происходит в области инвазивных технологий измерения электрической активности головного мозга, таких как интракортикальная имплантация микроэлектродных массивов (Miranda et al., 2015) и электрокортикография (Schalk & Leuthardt, 2011). При этом ЭКоГ является перспективным методом для реализации ИМК из-за более высокой стабильности сигнала при долговременном использовании по сравнению с интракортикально

имплантированными электродами (Shokouejad et al., 2019), низкого уровня шума и высокого пространственного разрешения, доступности измерения высоких частот, которые отражают локальные взаимодействия нейронов в коре (Schalk & Leuthardt, 2011), а также большого количества пациентов, проходящих мониторинг с использованием электрокортикографии, которых не требуется подвергать дополнительным рискам имплантации для проведения исследования.

Так, в последние десятилетия появилось большое число работ, которые реализуют декодирование параметров движения из ЭКоГ, с различной локализацией электродов, экспериментальными парадигмами и алгоритмами обработки сигнала. В частности, эти исследования показали возможность детектирования по сигналу ЭКоГ движений кисти (Pistohl et al. 2012; Bleichner et al. 2016), отдельных пальцев (Kubanek et al. 2009; Hotson et al. 2016), языка и губ (Graimann et al. 2003; Miller et al. 2007), а также ног (Satow et al. 2003). Как правило, движения выполняются на стороне тела, контралатеральной расположению электродов на коре, однако исследовалась также возможность декодирования движений, совершаемых на ипсилатеральной стороне тела (Hotson et al. 2014). В нескольких системах было реализовано управление курсором на основе модуляции сигнала, которую пользователь интерфейса воспроизводил произвольно при выполнении воображаемых движений, которые распознавал интерфейс (Leuthardt et al. 2006; Schalk et al. 2008; Wang et al. 2013). Ряд работ был направлен на распознавание дискретных поз руки и воспроизведение их протезом (Yanagisawa et al. 2011; Chestek et al. 2013; Hotson et al. 2016).

В настоящее время актуальным остается проектирование систем с возможностью декодирования параметров движения в реальном времени. Кроме того, ведется исследование возможности осязания протеза за счет микростимуляции участков сенсорной коры и методов сенсорного замещения (Johnson et al, 2013; Hiremath et al., 2017; Lee et al., 2018; Kramer et al., 2019).

Поскольку обратная связь играет большую роль в планировании и выполнении движения (Cronin et al., 2016), такая возможность поможет осуществлять более естественное и скоординированное управление устройством.

Таким образом, в настоящее время во всем мире ведется активная работа по улучшению характеристик декодирования параметров движения, реализации таких систем в режиме реального времени и созданию двунаправленного мозг-компьютер интерфейса с тактильной обратной связью, частью которой является данное исследование.

### **Объект и предмет исследования**

Объект исследования - когнитивные парадигмы реального времени, в частности, нейрокомпьютерные интерфейсы. Предмет исследования - экспериментальные парадигмы и математические методы декодирования параметров движения по измерениям электрофизиологической активности мозга для реализации нейрокомпьютерных интерфейсов.

### **Цель и задачи исследования**

Целью данного исследования является разработка методов улучшения характеристик интерфейса мозг-компьютер, а именно точности декодирования параметров движения в режиме реального времени и построение экспериментальных парадигм научения пользователя интерфейса посредством реализации принципа совместного человеко-машинного обучения.

Задачи исследования:

1. Разработать методы улучшения характеристик неинвазивного мозг-компьютер интерфейса на основе электроэнцефалограммы (ЭЭГ),

- связанные с использованием априорной информации о физиологической релевантности извлекаемых информативных признаков.
2. Разработать и реализовать экспериментальные парадигмы и способы обработки сигнала для инвазивного мозг-компьютер интерфейса на основе электрокортикограммы (ЭКоГ).
  3. Реализовать алгоритм декодирования параметров движения (траектории движения пальца) в режиме реального времени.
  4. Получить данные функционального картирования сенсомоторной коры в процессе тактильной стимуляции, выполнения моторных задач и речи, соотнести с результатами картирования методом кортикальной стимуляции.

### **Гипотезы исследования**

1. Использование априорных знаний о физиологической релевантности извлекаемых информативных признаков при построении систем неинвазивных идеомоторных нейроинтерфейсов позволяет повысить точность декодирования состояния в мозг-компьютер интерфейсе.
2. Данные электрокортикограммы, регистрируемой с сенсомоторной коры головного мозга содержат информацию, по которой можно в реальном времени (каузально) восстановить непрерывные параметры движения, такие как траектория движения пальца.
3. Использование совместного человеко-машинного научения оператора мозг-компьютер интерфейса является эффективной стратегией обучения испытуемого использованию интерфейса в реальном времени.
4. Анализ модуляций сигнала ЭКоГ во время воспроизведения речи может быть использован интраоперационно для картирования речевых зон наряду с методом кортикальной стимуляции.

## **Теоретико-методологические основы исследования**

Теоретико-методологическую базу исследования составили:

- в области физиологии движения - современные представления об организации планирования и выполнения движения в коре головного мозга (Johnson et al, 2013; Hiremath et al., 2017; Lee et al., 2018; Kramer et al., 2019 (Kandel et al., 2000; Squire et al., 2012));
- в области методов машинного обучения - работы по регистрации и обработке измерений электрофизиологической активности мозга для декодирования параметров движения (Lotte et al., 2007; Lotte et al., 2018; Schalk, Leuthardt, 2011; Anderson et al. 2012; Hotson et al. 2016; Xie et al., 2017);
- в области методов картирования - работы по кортикальной стимуляции сенсомоторной коры (S) и функциональному картированию с использованием электрокортикограммы (Brunner et al., 2009; Hill et al., 2012).

## **Методы исследования**

Электроэнцефалография (ЭЭГ), электрокортикография (ЭКОГ), кортикальная стимуляция, мозг-компьютер интерфейс, технологии машинного обучения.

## **Выборка и эмпирическая база исследования**

В исследованиях с использованием неинвазивного метода нейровизуализации (ЭЭГ): здоровые испытуемые 21-25 лет, мужчины и женщины. Исследование проведено в лабораториях Центра нейроэкономики и когнитивных исследований НИУ ВШЭ.

В исследованиях с использованием инвазивного метода нейровизуализации (ЭКоГ): когнитивно сохранные пациенты с эпилепсией или новообразованиями в неокортексе, старше 20 лет, которым показано проведение длительного и интраоперационного мониторинга эпилептической активности или инвазивная функциональная локализация невосполнимой коры при помощи электрокортикографии, подписавшие информированное согласие на участие в исследованиях. Исследование проведено в медицинском центре МГМСУ (Московского государственного медико-стоматологического университета имени А.И. Евдокимова), который является клиническим партнером Центра биоэлектрических интерфейсов НИУ ВШЭ.

### **Этапы организации исследования**

1. Улучшение характеристик неинвазивного интерфейса
  - a. Разработка метода классификации моторных состояний в мозг-компьютер интерфейсе на основе электроэнцефалограммы (ЭЭГ) с использованием физиологичных топографий
  - b. Разработка метода классификации моторных состояний в мозг-компьютер интерфейсе на основе ЭЭГ с учетом фоновых компонент
2. Разработка экспериментальных парадигм и методов декодирования параметров движения по данным электрокортикограммы (ЭКоГ)
  - a. Создание исследовательской установки для предъявления стимулов и синхронной регистрации непрерывных движений
  - b. Разработка экспериментальных парадигм и методов обработки сигнала для декодирования непрерывного движения из сигнала ЭКоГ
  - c. Проведение исследования по декодированию кинематики движения пальцев из сигнала ЭКоГ

- d. Реализация декодирования непрерывного движения пальца в режиме реального времени
- e. Реализация картирования сенсомоторной коры методом кортикальной стимуляции, функционального картирования во время тактильной стимуляции, выполнения моторных задач, а также функционального картирования речевых зон

### **Теоретическая и практическая значимость исследования**

В данном исследовании предложены методы улучшения рабочих характеристик неинвазивных нейроинтерфейсов за счет использования априорной информации, которые могут быть внедрены при реализации ИМК на основе ЭЭГ. Достоверность и обоснованность результатов в этой части исследования обеспечена использованием статистического анализа, а также показателями работы алгоритмов, полученных на данных, не использованных для настройки их параметров.

Разработанные экспериментальные установки, парадигмы и методы обработки сигнала электрокортикограммы вносят вклад в опыт разработки инвазивных интерфейсов на основе ЭКоГ, а также используются в рамках проекта Центра биоэлектрических интерфейсов НИУ ВШЭ для реализации инвазивного нейроинтерфейса с возможностью декодирования параметров движения в реальном времени и предъявлением обратной связи посредством кортикальной стимуляции. Достоверность и обоснованность результатов в этой части исследования обеспечена показателями работы алгоритмов, полученных на данных, не использованных для настройки их параметров, а также согласованностью результатов картирования с использованием кортикальной стимуляции и пассивной обработки данных, полученных во время тактильной стимуляции и выполнения моторных задач.

## **Основные результаты исследования и положения, выносимые на защиту**

1. Разработаны методы повышения характеристик работы неинвазивного мозг-компьютер интерфейса, связанные с использованием априорной информации. Результаты исследования показывают повышение точности декодирования при использовании разработанных методов по сравнению с базовым алгоритмом.
2. Созданы экспериментальные установки и экспериментальные парадигмы для декодирования параметров движения, тактильной и кортикальной стимуляции. Использование установок внедрено в исследовательской работе, проводимой в Центре биоэлектрических интерфейсов.
3. Разработана методика итеративного научения для реализации декодирования движения пальца в режиме реального времени. Использование итеративного научения позволило реализовать декодирование траектории движения пальца в режиме реального времени.
4. Реализована методика картирования коры посредством кортикальной стимуляции, функционального картирования во время выполнения моторной задачи и тактильной стимуляции, а также пассивного картирования речевых зон. Результаты, полученные при применении методик функционального картирования, согласуются с результатами кортикальной стимуляции.

## **Апробация результатов исследования (конференции, научные публикации)**

Результаты исследования докладывались на международной конференции молодых учёных “Psy-Вышка” (Москва, 2018, НИУ ВШЭ), международной научной конференции «Ломоносов» (Москва, 2018), международной конференции “Нейрокомпьютерный интерфейс: наука и практика” (Самара, 2019).

Результаты диссертационного исследования внедрены в исследовательской работе, проводимой в клинике Центром биоэлектрических интерфейсов Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики».

Результаты исследования представлены в 4 опубликованных статьях в изданиях, индексируемых Scopus:

1. Волкова К.В., Дагаев Н.И., Киселев А.С., Касумов В.Р., Александров М.В., Осадчий А.Е. Интерфейс мозг-компьютер: опыт построения, использования и возможные пути повышения рабочих характеристик. Журн. высш. нервн. деят. 2017, 67(4).
2. Боброва Е.В., Решетникова В.В., Волкова К.В., Фролов А.А. Влияние эмоциональной устойчивости на успешность обучения управлению системой "интерфейс мозг-компьютер". Журн. высш. нервн. деят. 2017, 67(4).
3. Dagaev N., Volkova K., Ossadtchi A. Latent variable method for automatic adaptation to background states in motor imagery BCI. J Neural Eng. 2017 Jul 18. doi: 10.1088/1741-2552/aa8065.
4. Smetanin, N., Volkova, K., Zabodaev, S., Lebedev, M., & Ossadtchi, A. (2018). NFBLab-a versatile software for neurofeedback and brain-computer interface research. Frontiers in neuroinformatics, 12, 100.

Одной статье, принятой к печати в издании, индексируемом Scopus:

1. Синкин М.В., Осадчий А.Е., Лебедев М.В., Волкова К.С., Кондратова М.С., Трифонов И.С, Крылов В.В. Высокоточное пассивное картирование речи во время резекции глиом доминантного полушария. *Нейрохирургия*.

А также одной статье, находящейся на стадии рецензирования в издании, индексируемом Scopus:

1. Volkova, K., Lebedev, M., Kaplan, A., Ossadtchi, A. Decoding Movement from Electroencephalographic Activity: a Review. Submitted to Journal: *Frontiers in Neuroinformatics*.

## **Список использованной литературы**

Abdulkader, S. N., Atia, A., & Mostafa, M. S. M. (2015). Brain computer interfacing: Applications and challenges. *Egyptian Informatics Journal*, 16(2), 213-230.

Anderson, N. R., Blakely, T., Schalk, G., Leuthardt, E. C., & Moran, D. W. (2012). Electrocorticographic (ECoG) correlates of human arm movements. *Experimental brain research*, 223(1), 1-10.

Bleichner, M. G., Freudenburg, Z. V., Jansma, J. M., Aarnoutse, E. J., Vansteensel, M. J., & Ramsey, N. F. (2016). Give me a sign: decoding four complex hand gestures based on high-density ECoG. *Brain Structure and Function*, 221(1), 203-216.

Brunner, P., Ritaccio, A. L., Lynch, T. M., Emrich, J. F., Wilson, J. A., Williams, J. C., ... & Schalk, G. (2009). A practical procedure for real-time functional mapping of eloquent cortex using electrocorticographic signals in humans. *Epilepsy & Behavior*, 15(3), 278-286.

Carmena, J. M., Lebedev, M. A., Crist, R. E., O'Doherty, J. E., Santucci, D. M., Dimitrov, D. F., ... & Nicolelis, M. A. (2003). Learning to control a brain-machine interface for reaching and grasping by primates. *PLoS biology*, 1(2), e42.

Ball, T., Schulze-Bonhage, A., Aertsen, A., & Mehring, C. (2009). Differential representation of arm movement direction in relation to cortical anatomy and function. *Journal of neural engineering*, 6(1), 016006.

Chaudhary, U., Birbaumer, N., & Ramos-Murguialday, A. (2016). Brain-computer interfaces for communication and rehabilitation. *Nature Reviews Neurology*, 12(9), 513.

Chestek, C. A., Gilja, V., Blabe, C. H., Foster, B. L., Shenoy, K. V., Parvizi, J., & Henderson, J. M. (2013). Hand posture classification using electrocorticography

signals in the gamma band over human sensorimotor brain areas. *Journal of neural engineering*, 10(2), 026002.

Collinger, J. L., Wodlinger, B., Downey, J. E., Wang, W., Tyler-Kabara, E. C., Weber, D. J., ... & Schwartz, A. B. (2013). High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia. *The Lancet*, 381(9866), 557-564.

Cronin, J. A., Wu, J., Collins, K. L., Sarma, D., Rao, R. P., Ojemann, J. G., & Olson, J. D. (2016). Task-specific somatosensory feedback via cortical stimulation in humans. *IEEE transactions on haptics*, 9(4), 515-522.

Graimann, B., Huggins, J. E., Schlogl, A., Levine, S. P., & Pfurtscheller, G. (2003). Detection of movement-related patterns in ongoing single-channel electrocorticogram. *IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 11(3), 276-281.

Hill, N. J., Gupta, D., Brunner, P., Gunduz, A., Adamo, M. A., Ritaccio, A., & Schalk, G. (2012). Recording human electrocorticographic (ECoG) signals for neuroscientific research and real-time functional cortical mapping. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, (64), e3993.

Hiremath, S. V., Tyler-Kabara, E. C., Wheeler, J. J., Moran, D. W., Gaunt, R. A., Collinger, J. L., ... & Wang, W. (2017). Human perception of electrical stimulation on the surface of somatosensory cortex. *PloS one*, 12(5), e0176020.

Hochberg, L. R., Serruya, M. D., Friehs, G. M., Mukand, J. A., Saleh, M., Caplan, A. H., ... & Donoghue, J. P. (2006). Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia. *Nature*, 442(7099), 164.

Hotson, G., Fifer, M. S., Acharya, S., Benz, H. L., Anderson, W. S., Thakor, N. V., & Crone, N. E. (2014). Coarse electrocorticographic decoding of ipsilateral reach in patients with brain lesions. *PloS one*, 9(12), e115236.

Hotson, G., McMullen, D. P., Fifer, M. S., Johannes, M. S., Katyal, K. D., Para, M. P., ... & Crone, N. E. (2016). Individual finger control of a modular prosthetic

limb using high-density electrocorticography in a human subject. *Journal of neural engineering*, 13(2), 026017.

Jayaram, V., Alamgir, M., Altun, Y., Scholkopf, B., & Grosse-Wentrup, M. (2016). Transfer learning in brain-computer interfaces. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 11(1), 20-31.

Johnson, L. A., Wander, J. D., Sarma, D., Su, D. K., Fetz, E. E., & Ojemann, J. G. (2013). Direct electrical stimulation of the somatosensory cortex in humans using electrocorticography electrodes: a qualitative and quantitative report. *Journal of neural engineering*, 10(3), 036021.

Kandel, E. R. Schwartz, J. H. & Jessell T. M. (Eds.). (2000). Principles of neural science (Vol. 4, pp. 1227-1246). Department of Biochemistry and Molecular Biophysics, New York: McGraw-hill.

Kim, G., Kim, K., Lee, E., An, T., Choi, W., Lim, G., & Shin, J. (2018). Recent progress on microelectrodes in neural interfaces. *Materials*, 11(10), 1995.

Kohler, F., Gkogkidis, C. A., Bentler, C., Wang, X., Gierthmuehlen, M., Fischer, J., ... & Ball, T. (2017). Closed-loop interaction with the cerebral cortex: a review of wireless implant technology. *Brain-Computer Interfaces*, 4(3), 146-154.

Kramer, D. R., Kellis, S., Barbaro, M., Salas, M. A., Nune, G., Liu, C. Y., ... & Lee, B. (2019). Technical considerations for generating somatosensation via cortical stimulation in a closed-loop sensory/motor brain-computer interface system in humans. *Journal of Clinical Neuroscience*, 63, 116-121.

Kubaneck, J. O. J. W. G. S. J., Miller, K. J., Ojemann, J. G., Wolpaw, J. R., & Schalk, G. (2009). Decoding flexion of individual fingers using electrocorticographic signals in humans. *Journal of neural engineering*, 6(6), 066001.

Lee, B., Kramer, D., Armenta Salas, M., Kellis, S., Brown, D., Dobрева, T., ... & Andersen, R. A. (2018). Engineering artificial somatosensation through cortical stimulation in humans. *Frontiers in systems neuroscience*, 12, 24.

Leuthardt, E. C., Miller, K. J., Schalk, G., Rao, R. P., & Ojemann, J. G. (2006). Electrocorticography-based brain computer interface-the Seattle experience. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 14(2), 194-198.

Lotte, F., Congedo, M., Lécuyer, A., Lamarche, F., & Arnaldi, B. (2007). A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces. *Journal of neural engineering*, 4(2), R1.

Lotte, F., Bougrain, L., Cichocki, A., Clerc, M., Congedo, M., Rakotomamonjy, A., & Yger, F. (2018). A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces: a 10 year update. *Journal of neural engineering*, 15(3), 031005.

Machado, S., Araújo, F., Paes, F., Velasques, B., Cunha, M., Budde, H., ... & Piedade, R. (2010). EEG-based brain-computer interfaces: an overview of basic concepts and clinical applications in neurorehabilitation. *Reviews in the Neurosciences*, 21(6), 451-468.

Mak, J. N., & Wolpaw, J. R. (2009). Clinical applications of brain-computer interfaces: current state and future prospects. *IEEE reviews in biomedical engineering*, 2, 187-199.

Miller, K. J., Leuthardt, E. C., Schalk, G., Rao, R. P., Anderson, N. R., Moran, D. W., ... & Ojemann, J. G. (2007). Spectral changes in cortical surface potentials during motor movement. *Journal of Neuroscience*, 27(9), 2424-2432.

Miranda, R. A., Casebeer, W. D., Hein, A. M., Judy, J. W., Krotkov, E. P., Laabs, T. L., ... & Weber, D. J. (2015). DARPA-funded efforts in the development of novel brain-computer interface technologies. *Journal of neuroscience methods*, 244, 52-67.

Padfield, N., Zabalza, J., Zhao, H., Masero, V., & Ren, J. (2019). EEG-based brain-computer interfaces using motor-imagery: Techniques and challenges. *Sensors*, 19(6), 1423.

Pistohl, T., Schulze-Bonhage, A., Aertsen, A., Mehring, C., & Ball, T. (2012). Decoding natural grasp types from human ECoG. *Neuroimage*, 59(1), 248-260.

Ritaccio, A. L., Brunner, P., & Schalk, G. (2018). Electrical Stimulation Mapping of the Brain: Basic Principles and Emerging Alternatives. *Journal of clinical neurophysiology: official publication of the American Electroencephalographic Society*, 35(2), 86-97.

Satow, T., Matsushashi, M., Ikeda, A., Yamamoto, J., Takayama, M., Begum, T., ... & Hashimoto, N. (2003). Distinct cortical areas for motor preparation and execution in human identified by Bereitschaftspotential recording and ECoG-EMG coherence analysis. *Clinical neurophysiology*, 114(7), 1259-1264.

Schalk, G., Miller, K. J., Anderson, N. R., Wilson, J. A., Smyth, M. D., Ojemann, J. G., ... & Leuthardt, E. C. (2008). Two-dimensional movement control using electrocorticographic signals in humans. *Journal of neural engineering*, 5(1), 75.

Schalk, G. (2010). Can electrocorticography (ECoG) support robust and powerful brain-computer interfaces?. *Frontiers in neuroengineering*, 3, 9.

Schalk, G., & Leuthardt, E. C. (2011). Brain-computer interfaces using electrocorticographic signals. *IEEE reviews in biomedical engineering*, 4, 140-154.

Squire, L., Berg, D., Bloom, F. E., Du Lac, S., Ghosh, A., & Spitzer, N. C. (Eds.). (2012). *Fundamental neuroscience*. Academic Press.

Velliste, M., Perel, S., Spalding, M. C., Whitford, A. S., & Schwartz, A. B. (2008). Cortical control of a prosthetic arm for self-feeding. *Nature*, 453(7198), 1098.

Waldert, S. (2016). Invasive vs. non-invasive neuronal signals for brain-machine interfaces: will one prevail?. *Frontiers in neuroscience*, 10, 295.

Wang, W., Collinger, J. L., Degenhart, A. D., Tyler-Kabara, E. C., Schwartz, A. B., Moran, D. W., ... & Kelly, J. W. (2013). An electrocorticographic brain interface in an individual with tetraplegia. *PloS one*, 8(2), e55344.

Xie, Ziqian, Odelia Schwartz, and Abhishek Prasad (2017). “Decoding of finger trajectory from ECoG using Deep Learning”. In: *Journal of neural engineering*.

Yanagisawa, T., Hirata, M., Saitoh, Y., Goto, T., Kishima, H., Fukuma, R., ... & Yoshimine, T. (2011). Real-time control of a prosthetic hand using human electrocorticography signals. *Journal of neurosurgery*, 114(6), 1715-1722.

Yanagisawa, T., Hirata, M., Saitoh, Y., Kishima, H., Matsushita, K., Goto, T., ... & Yoshimine, T. (2012). Electrocorticographic control of a prosthetic arm in paralyzed patients. *Annals of neurology*, 71(3), 353-361.